

0- 773204

На правах рукописи



Гарбацевич Владимир Алексеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ И СИГНАЛОВ
ИОНОЗОНДА И ГЕОРАДАРА ДЛЯ
ДИАГНОСТИКИ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ СРЕД**

01.04.03 – радиофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Троицк - 2008

Работа выполнена в Учреждении Российской Академии наук
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук Козлов Александр Николаевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,

профессор Данилкин Николай Петрович

кандидат физико-математических наук Крашенинников Игорь Васильевич

Ведущая организация:

Научно - исследовательский институт физики,

Южного Федерального университета (г. Ростов-на-Дону)

Защита состоится 23 декабря 2008 г. в 14 часов 30 мин. на заседании
диссертационного совета Д002.237.01 в ИЗМИРАН по адресу:
142190, Московская обл., г. Троицк (проезд автобусом № 398,531,512,515 от
станции метро «Теплый стан» до остановки «ИЗМИРАН»).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЗМИРАН.

Автореферат разослан « 21 » ноября 2008 г.

НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000439054

Ученый секретарь

диссертационного совета Д002.237.01,

доктор физико-математических наук

Михайлов Ю.М.

Общая характеристика работы

Диссертация посвящена вопросам исследования ионосферы импульсными радиосигналами и подземных радиофизических неоднородностей на базе созданных при активном участии автора измерительных геофизических комплексов. Объектом исследований выбраны широкополосные излучатели и сигналы, применяемые для вертикального зондирования ионосферы и измерения поглощения радиоволн в ионосфере и широкополосные излучатели георадаров. В диссертации анализируются характеристики антенн ионозондов в ближней зоне и вблизи земли. С этих позиций также рассмотрена работа антенн георадара с применением видеоимпульсов для зондирования подповерхностных аномалий проводимости и диэлектрической проницаемости. В диссертации эти темы объединены в связи с тем, что излучатели для ионозонда и георадара должны быть: во-первых – широкополосными с коэффициентом перекрытия по частоте не менее 10, а во-вторых – обе системы работают на границе раздела контрастных радиофизических сред. Представлены и проанализированы экспериментальные данные исследования ионосферы, полученные с использованием разработанных автором излучателей и аппаратуры в экспедициях на научно-исследовательских судах.

Актуальность работы

Целью зондирования ионосферы радиоволнами с помощью ионозондов всех типов является оперативное получение параметров состояния ионосферной плазмы. Достоверные, неискаженные радиотехническими средствами, данные о характеристиках ионизированных слоев важны как для исследований состояния самой ионосферы, так и для практики коротковолновой связи. Расширить информативность ионозонда для получения информации о *D* и *E* областях ионосферы позволяют измерения поглощения радиоволн, проводимые на ряде фиксированных частот нижнего участка диапазона зондирования. Зачастую успех таких исследований определяет правильный вы-

бор приемных и передающих антенных систем, а также выбор вида зондирующих сигналов. Поэтому создание широкополосного излучателя (0,5–20 МГц) с диаграммой направленности в зенит с наименьшим количеством боковых лепестков и равномерным значением коэффициента усиления по диапазону частот считается одной из самых сложных задач в построении измерительных комплексов радиозондирования ионосферы. Правильный выбор (разработка и изготовление антенн) излучателя важен ещё и потому, что современные излучатели в ионозондах представляют собой сложные и дорогостоящие устройства. Ошибки в выборе излучателя зачастую не поддаются исправлению (из-за ограничений на выбор площади для установки антенн, на наличие ранее установленных мачт и т. п.), они вносят существенные погрешности при анализе полученной в экспериментах геофизической информации из-за трудностей учета диаграмм направленности и сопротивления излучателей в широком диапазоне частот. Снижение мощности передающих устройств ионозондов, диктуемое как техническими, так и экологическими требованиями, выдвигает на первый план актуальность оптимизации параметров антенных систем и использующихся при радиозондировании ионосферы различного вида широкополосных сигналов.

В георадарных излучателях близость земли играет решающую роль в передаче энергии в подповерхностный пространства земли. Антенная система георадара должна иметь широкую полосу частот и в тоже время очень низкую добротность, т. к. время переходного процесса не должно превышать первые несколько наносекунд. Особый случай представляет вариант георадара для дистанционного зондирования подповерхностного пространства земли, когда георадар с антенной размещается непосредственно над поверхностью земли. Вопросы исследования георадарных антенн для дистанционного зондирования подповерхностной среды весьма актуальны, поскольку на настоящий момент для этой цели используются классические радиолокаторы с присущими им ограничениями.

В обоих случаях излучатели для работы ионозонда и георадара должны

быть не только широкополосными с большим коэффициентом перекрытия по частоте, но иметь хорошее согласование с передающим устройством.

Измерения поглощения радиоволн методом A1 дополняют информацию о состоянии слоев *D* и *E* ионосферы необходимую для решения ряда задач энергетики и распространения радиоволн и физики ионосферы.

Кроме того, остаются актуальными и вопросы изучения пространственно-временной структуры практически всех слоев ионосферы, включая область *D*. Поэтому получение экспериментальных данных не только о средних геофизических параметрах ионосферы, но также и об их пространственных неоднородностях и временных вариациях с помощью методов вертикального зондирования и ионосферного поглощения радиоволн важны и в наши дни.

Цель работы

Экспериментальное исследование сигналов излучения с внутриимпульсной частотной модуляцией низкой частотой и регистрации фазы частоты модуляции, для увеличения точности измерения действующих высот отражения ионосферы в процессе измерения ионосферного поглощения радиоволн.

Проведение компьютерного моделирования находящихся в эксплуатации антенн ионозондов и выработке рекомендаций по повышению эффективности их работы.

Обоснование принципов построения новых излучателей ионозондов.

Разработка и экспериментальная апробация антенны для георадара, работающего с применением видеосигнала. Расчет антенной системы для георадара воздушного базирования.

Подготовка комплекса аппаратуры для экспедиций и получение экспериментальных данных параметров ионосферы в акватории Мирового океана, анализ данных измерений.

Научная новизна работы:

1. Впервые использовано зондирующее излучение с внутримпульсной частотной модуляцией низкой частотой и измерения ее фаза для процесса измерения ионосферного поглощения радиоволн, что позволило существенно увеличить точность измерения действующих высот отражения от слоя *E* (среднестатистическая ошибка 0.3 км).

2. Аналитическими расчетами и путем компьютерного моделирования произведены исследования параметров передающих антенн ионозондов. В результате:

а) выработаны рекомендации для улучшения параметров существующих антенн как стационарных, так и экспедиционных ионозондов (диаграммы направленности, коэффициента усиления по диапазону и т. д.);

б) создана более эффективная методика расчета ромбических антенн ионозонда и обоснованы принципы построения новых антенных систем для измерения поглощения радиоволн;

в) впервые предложена синтезированная активная антенна для ионосферного измерительного комплекса.

3. Исследованы и внедрены в эксплуатацию дипольные резистивно-нагруженные антенны георадара. Впервые рассчитана антенная система георадара для воздушного размещения.

4. Получен большой массив экспериментальных данных по измерениям поглощения радиоволн и данных вертикального импульсного радиозондирования на акватории Мирового океана. На основании полученных данных выявлены неоднородности в широтно-долготном распределении величины поглощения.

Научная и практическая значимость работы

Результаты диссертационной работы являются вкладом в дальнейшее развитие радиофизических методов и инструментов исследования среды и дают новые возможности в получении экспериментальных данных.

Результаты проведенных исследований доведены до практического воплощения в виде макетов, работающих систем и устройств.

Разработанные и защищенные патентом РФ георадары используются в геологии, археологии, на стройплощадках, в коммунальном хозяйстве и других областях народного хозяйства, где нужно получить информацию о подземных и подводных объектах.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Экспериментально установлено, что применение зондирующего излучения с внутриимпульсной частотной модуляцией низкой частотой и измерение ее фазы для процесса измерения ионосферного поглощения радиоволн позволило существенно увеличить точность измерения действующих высот отражения от слоя E (до среднестатистических погрешностей 0.3 км.).

2. Аналитическими расчетами и методом компьютерного моделирования произведены исследования параметров передающих антенн ионозондов. В результате:

а) выработаны рекомендации и методика расчетов для улучшения параметров существующих антенн ионозондов и установок измерения поглощения радиоволн;

б) обоснованы принципы построения новых антенн для ионосферного измерительного комплекса.

3. Исследованы антенны георадара. Проведена экспериментальная проверка макетов антенн. Принята в эксплуатацию дипольная антенна с распределенной резистивной нагрузкой. Предложена антенная система для георадара воздушного базирования.

4. Экспериментально установлено, что существуют зоны неоднородности в широтно-долготном распределении поглощения радиоволн в ионосфере в планетарном масштабе.

Личный вклад автора

Результаты по теме диссертации получены лично автором или при его активном участии.

Автором предложен, исследован и применен на практике метод использования частотно-модулированных сигналов для повышения точности измерения действующих высот ионосферы по фазе частоты модуляции в процессе измерения поглощения радиоволн в ионосфере. Итогом этой работы явилось создание коллективом сотрудников ИЗМИРАН, при ведущем участии автора, аппаратно-измерительного комплекса «Парус» для измерения поглощения радиоволн. Дальнейшая модификация комплекса, позволила создать ионозонд «Парус».

Автором лично создана и экспериментально проверена судовая антенна для ионозондов. Автором проведены исследования передающих антенн ионозонда путем компьютерного моделирования, в результате чего внесен ряд предложений по усовершенствованию существующих антенн. Предложена методика расчета ромбических антенн ионозонда, определены пути дальнейшего развития передающих антенн ионозондов.

Автор принимал самое непосредственное участие в подготовке аппаратуры и проведении экспедиций на научно-исследовательских судах НИС «Академик Курчатов» и Академик Королев». Обработка данных измерений, выполненная с участием автора по результатам экспериментов в экспедициях, позволила выявить неоднородное распределение поглощения радиоволн в планетарном масштабе.

Автором лично испытано большое количество макетов передающих и приемных антенн георадаров, рассмотрены вопросы согласования их с приемниками. Внедрена в практику дипольная антенна с распределенной резисторной нагрузкой. Автором определены требования и произведены расчеты антенной системы георадара воздушного базирования.

Содержание и результаты исследований, выполненных по теме диссертации, отражены в 16 научных публикациях в отечественной и зарубежной печати; из них 2 патента РФ, в журналах, входящих в список ВАК, опубликовано 4 работы.

Апробация результатов работы.

Основные результаты диссертационной работы В. А. Гарбацевича докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях:

- XI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн, Казанский Государственный университет, 1975.
- 6-th International Conference on Ground Penetrating Radars. GPR'96, Sendai, Japan, Sept. 30 – Oct. 3, 1996.
- International microwave conference MICON-96, Poland, Warsaw, May 27–30, 1996.
- 52 Научной сессии, посвященной. Дню радио, Москва, МГУ, 1997.
- XIV региональной конференции по распространению радиоволн, Санкт-Петербург, 2008.

Результаты исследований по теме диссертации неоднократно обсуждались на научных семинарах в ИЗМИРАН.

Объём и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 135 страницах. Она содержит 55 рисунков, 5 таблиц и библиографию из 87 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ВО ВВЕДЕНИИ дан краткий обзор затронутых в диссертации проблем, сформулированы цель и основные задачи диссертации. Дано представление о содержании работы с разделением по главам.

ПЕРВАЯ ГЛАВА представляет собой обзор радиофизических методов диагностики ионосферы, научной аппаратуры, предназначенной для вертикального зондирования ионосферы, а также применение георадаров для ра-

диозондирования подземных слоев и объектов. Во введении первой главы кратко рассмотрена история ионосферных наблюдений.

Ионозондом называют коротковолновый радиолокатор, работающий в диапазоне частот (существенном для диагностики ионосферы) – обычно 1–20 МГц. По указанному диапазону ионозонд перестраивается с шагом по частоте от 1 до 200 кГц. Для вертикального зондирования излучение направляется в зенит. Шкала высот отражения обычно составляет 90–1000 километров. Время снятия высотно-частотной характеристики ионосферы – ионограммы, составляет от нескольких секунд до единиц минут, в зависимости от установленной величины шага по частоте.

В СССР Н.Д. Булатов впервые создал ионозонд типа ПИОН (1951–1955 г.г.), на базе которого была разработана типовая ионосферная станция АИС. Выпуск серии ионозондов АИС был приурочен к проведению Международного геофизического года (1957–1958 г.г.).

Как один из возможных режимов работы ионозонда рассмотрен метод измерения поглощения радиоволн в ионосфере. В этом режиме ионозонда происходит измерение амплитуд отраженных от ионосферы радиоимпульсов. Измерения производятся поочередно на одной из ряда выбранных частот с частотой повторения импульсов 0.3 – 1 Гц.

Приведен обзор мирового опыта построения антенн ионозондов, с геометрическими размерами мачт 20–90 метров. В мировой практике антенны, созданные для ионозондов, делятся на ромбические, дельта-антенны, дипольные, спиральные, встречных спиралей, логопериодические диполи, логопериодические со сложной зигзагообразной конструкцией.

Описана история построения георадаров, их возможности и перспективы. Использование стандартной радиолокационной аппаратуры для зондирования грунтов и пород оказалось возможным в случае малого затухания радиоволн в среде. Для обычных радиолокаторов время прихода отраженных сигналов от залегающей породы оказывается очень малым и они накладываются на зондирующий импульс, поэтому не могут быть выделены. Выход из

положения был найден путем применения импульса тока без несущей частоты, который называют видеоимпульсом. Такой импульс создает одно или несколько колебаний тока в антенне и характеризуется широкой полосой частот излучения. Короткий видеоимпульсный сигнал обладает наилучшими характеристиками для георадара, поскольку обеспечивает максимальную глубину зондирования и максимальное пространственное разрешение. Создание антенны для излучения такого импульса оказалось сложной задачей. Из-за высокой добротности антенного контура колебательный процесс невозможно погасить без потерь энергии. Приведены параметры дипольной антенны с распределенной резистивной нагрузкой, нашедшая применение на практике. Также рассчитан вариант ромбической антенны для дистанционного зондирования подповерхностных радиофизических неоднородностей земли.

ВО ВТОРОЙ ГЛАВЕ рассмотрены параметры ионозондов с точки зрения получаемой информации и произведен анализ применяемых сигналов. Обсуждены результаты экспериментов по вертикальному зондированию ионосферы короткими импульсами длительностью 30 – 150 мкс. Рассмотрены различные типы применяемых модулированных импульсов излучения. Сделаны выводы об информативности применяемых сигналов.

Метод измерения поглощения радиоволн в ионосфере рассмотрен как один из режимов работы ионозонда, позволяющий расширить информативность ионозонда за счет получения информации о *D* и *E* областях ионосферы. Следовательно, крайне важна эффективность работы антенной системы в низкочастотном участке диапазона частот ионозонда, где производят измерение поглощения радиоволн.

Применение частотно-модулированных низкой частотой импульсных сигналов и измерение фазы частоты модуляции принятых сигналов ведет к повышению точности измерения действующих высот ионосферы в процессе измерения поглощения радиоволн в ионосфере. Для этой цели использовался метод частотной модуляции на частоте 15 кГц при индексе частотной модуляции 0.3. Для отсчета действующей высоты (h') отраженного от ионосферы

сигнала использовалось измерение фазы модулирующего сигнала. Для контроля достоверности отсчета действующей высоты использовались отсчеты разрушения закона модуляции. На рис.1 приведены интервалы достоверности измерений h' в км, а на рис.2 вероятностное распределение отсчета (P).

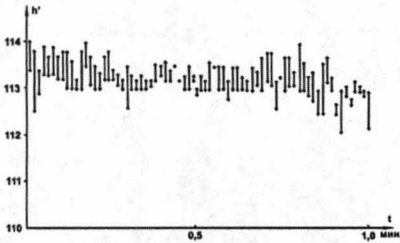


Рис.1

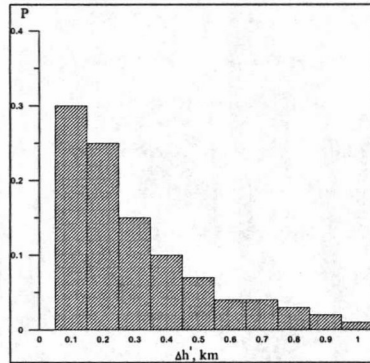


Рис.2

В конце главы приведены параметры измерительного комплекса «Парус», созданного для этой цели, и параметры дальнейшего развития ионозонда «Парус».

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ представлены результаты исследования излучателей ионозондов и георадаров. Компьютерное моделирование позволило определить параметры ромбических и дельта антенн ионозонда для излучения в зенит.

Для выполнения компьютерного моделирования антенн в настоящей работе использовалась общедоступная программа MMANA-GAL [2]. В ней использует ядро программы MININEC с имеющимися у него ограничениями, но, учитывая рекомендации авторов программы, часть моделирования проводилась с помощью специальной утилиты NEC-2 для MMANA. Программа снабжена хорошим интерфейсом и большим набором вычисляемых функций. Программа позволяет вычислить коэффициент усиления антенны G_a , коэф-

фициент стоячей волны КСВ, диаграмму направленности в разных плоскостях, включая трехмерную, полное сопротивление Z на частотах диапазона работы и токи в проводниках антенн.

Для компьютерного моделирования выбрана антенна ионозонда ИЗ-МИРАН, представляющая собой два асимметричных по высоте ромба с длиной пар проводов 31.3+34.2 м для малого ромба и 59.5+61.3 м для большого. Пары проводов разнесены на 1.5 метра для большого ромба и на 0.8 метра для малого ромба. Высота металлических двух боковых опор 16 метров и центральной мачты - 36 метров. Передатчик подключается в диапазоне 1-5 МГц – к большому ромбу, а в диапазоне 5-20 МГц – к малому. Волновое сопротивление питающего фидера составляет 600 Ом. Нагрузочные резисторы для каждого из ромбов по 600 Ом расположены в верхней точке центральной мачты.

На рис.3 представлен пример полученных пространственных диаграмм направленности большого ромба при моделировании реальной антенной системы ионозонда.

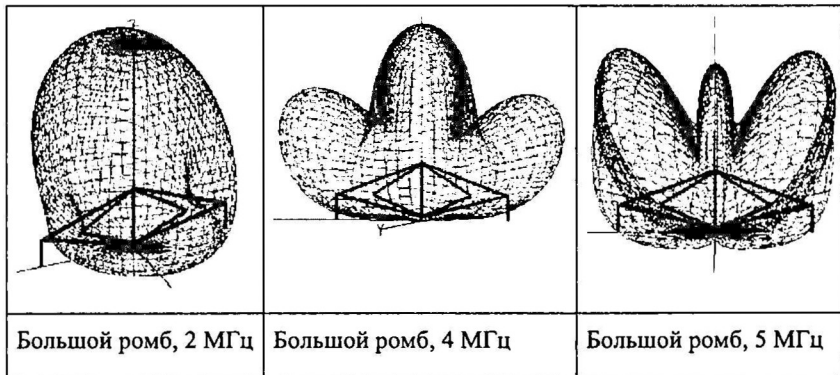


Рис.3

Из компьютерного моделирования также следует, что малый ромб указанной антенной системы имеет приемлемые характеристики по диаграмме направленности в диапазоне частот от 4 до 10 МГц. В

совокупности общее перекрытие по частоте двух антенн обеспечивает измерение параметров ионосферы в периоды времени минимума солнечной активности. В периоды максимума солнечной активности отражения радиоволн от ионосферы наблюдается на частотах выше 10 МГц. Поэтому для расширения частотного диапазона до 20 МГц было проведено компьютерное моделирование третьей ромбической антенны, плоскость которой ортогональна плоскости антенн действующей системы. Модель полной антенной системы показана на рис.4.

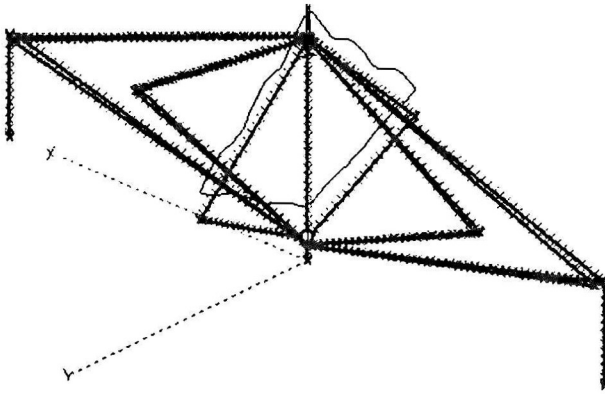


Рис.4

Результаты моделирования коэффициента усиления G_a в Db и KCB для всех трех антенн с учетом взаимовлияния отображены на Рис.5..

Компьютерное моделирование третьего дополнительного ромба проведено на базе разработанной автором методики нахождения линейных параметров асимметричных ромбических антенн, предназначенных для излучения в зенит. Используемая методика расчетов также позволила увеличить диапазон перекрытия антенны по частоте.

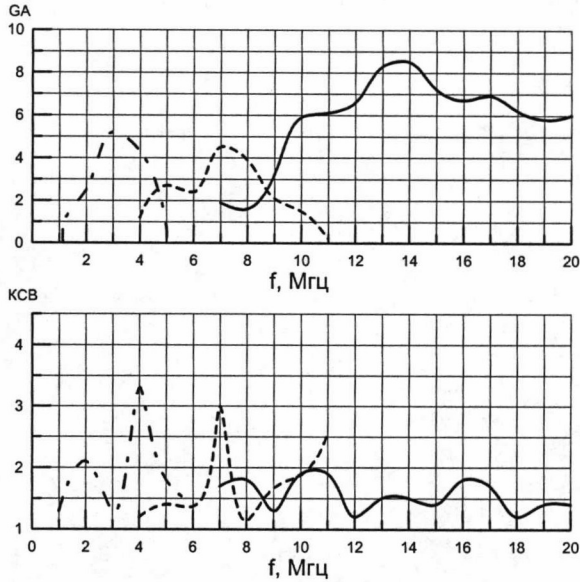


Рис. 5 Коэффициенты G_a в Db и KCB для трех антенн, штрих-пунктир – большой ромб, пунктир – малый ромб, сплошная – дополнительный ромб.

Результаты компьютерного моделирования антенны ионозонда АИС, рекомендованной для вертикального зондирования как типовая, показали, что для перекрытия частотного диапазона ионозонда с помощью двух ромбических антенн требуется оптимизация настройки, поскольку имеются участки диапазона частот зондирования, где антенна не дает преимущественного излучения в вертикальном направлении.

Анализ параметров ромбических антенн, работающих в широком диапазоне частот вблизи земли, показал, что не рекомендуется применять наклон полотна антенны больше 45° относительно линии горизонта.

Проведены вычисления параметров дельта антенны. Антенны такого типа (из-за неравномерности характеристик по диапазону частот ионозонда) более эффективны при применении их в качестве приемных, а не передающих.

Рассмотрен вариант судовой дельта антенны, проверенный в морских экспедициях при измерении поглощения. Для характеристик такой антенны важен учет параметров подстилающей поверхности (стальной корпус судна и морская вода) и способ подключения фидера антенны. Дельта антенна с верхним питанием явилась оптимальным вариантом для размещения на судне.



Рис.6

На рис. 6 представлена условная схема размещения судовой дельта антенны и ее габаритные размеры. Такой вид дельта-антенн может использоваться для установки на подвижные платформы.

В работе предложена и рассмотрена синтезированная магнитная активная антенна ионозонда на базе рамочной антенны. Компьютерное моделирование таких систем показало её перспективность для ионосферного зондирования. Отмечено, что для реализации синтезированной активной антенны есть все предпосылки: наличие на рынке генераторов с цифровым управлением частоты и фазы, соответствующие полупроводниковые приборы для создания усилителей мощности.

Далее в главе обсуждаются возможности георадаров. В обычных радиолокаторах пространственное разрешение составляет единицы – сотни метров, а максимальная глубина зондирования радаров обусловлена, в основном, затуханием в среде. Для того чтобы увеличить разрешение по времени (по пространству), необходимо уменьшать длительность огибающей радиоимпульса. С другой стороны, для того, чтобы увеличить глубину зон-

дирования, необходимо понижать несущую частоту. В пределе для возбуждения антенны необходимо использовать сверхкороткий мощный импульс тока, имеющий от одного до нескольких колебаний тока (напряжения, напряженности электрического или магнитного поля – в зависимости от того, в какой части аппаратуры или среды он рассматривается). Для генерирования зондирующих импульсов в георадарах, как правило, используется так называемый «метод ударного возбуждения» – разряд высоковольтного конденсатора в антенну.

Для обеспечения аperiodического режима излучения необходимо ввести в антенну дополнительное подавление колебательного режима, как это выполнено в резистивно-нагруженных диполях. Аperiodический зондирующий импульс для такого диполя показан на рис. 7.

Радарограммы, получаемые с помощью аperiodического сигнала возбуждения, обладают существенно лучшим качеством по пространственному и временному разрешению, чем при использовании возбуждающего осциллирующего сигнала.

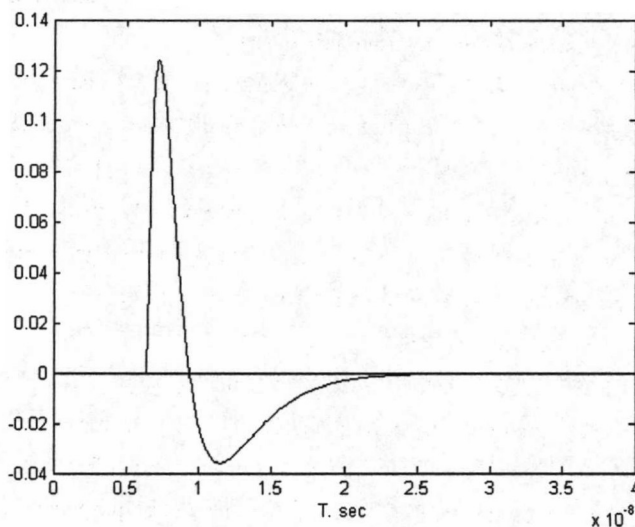


Рис.7 (по оси y – условные единицы, по оси x – время)

В главе представлены результаты по разработке дипольной антенны георадара с распределенной резистивной нагрузкой. Один из рабочих вариантов антенн георадара показан на рис.8.

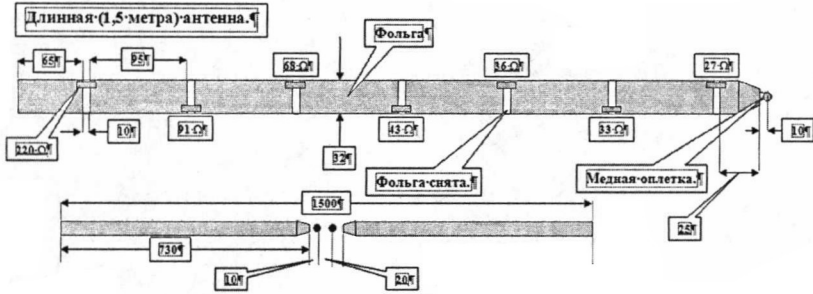


Рис.8

Резистивно-нагруженный диполь георадара. Вверху представлено левое плечо антенны. Размеры указаны в мм

С момента получения уверенных результатов работы георадара с поверхности земли, воды и морского дна актуальным стал вопрос о дистанционном зондировании земли, т.е. об георадарных измерениях с определенной высоты над поверхностью земли. В работе представлены результаты расчета вариантов ромбических антенн дистанционного размещения для зондирования подземных радиофизических неоднородностей.

В ЧЕТВЕРТОЙ ГЛАВЕ представлены экспериментальные результаты измерений поглощения радиоволн в экспедициях научно-исследовательских судов в акваториях мирового океана. Определен широтно-долготный ход поглощения радиоволн в нижней ионосфере на большой площади.

Изучение данных о поглощении радиоволн при вертикальном падении их на ионосферу, полученных мировой сетью станций, привело к выводу, что пространственное распределение поглощения существенно сложнее, чем это следует из теоретических оценок. Величина поглощения L в любой точке земного шара может быть выражена эмпирической формулой:

$$L = L_{\omega}(\varphi) + L_g(\Phi) \quad (1)$$

где $L_{\omega}(\varphi)$ - составляющая, обусловленная волновым излучением Солнца и зависящая от географической широты φ ; $L_g(\Phi)$ - составляющая, связанная с геомагнитной широтой Φ . Поскольку более или менее заметные геомагнитные эффекты в области E до сих пор не обнаружены, можно ожидать, что указанная зависимость присуща глобальному распределению электронной концентрации N_e в области D . Действительно, анализ 450 профилей $N_e(h)$, полученных с помощью ракет, подтвердил этот вывод. Отметим, что выражение (1) выведено на основании данных измерений при очень высокой солнечной активности ($R \approx 200$) для частоты зондирования $f = 2,0$ МГц.

На рис.9 представлены экспериментальные данные и результаты расчетов величины L по формуле (1) для сезонов, соответствующих периоду наблюдений на судах (штриховая кривая). Экспериментальные же значения L получены в широком диапазоне частот и при различных уровнях активности Солнца. Приведение их к определенным частотам зондирования и активности Солнца мало что дало бы, поскольку соответствующие коэффициенты пересчета весьма неопределенны. Вследствие этого сопоставление экспериментальных широтных ходов поглощения с расчетными проводится только качественно.

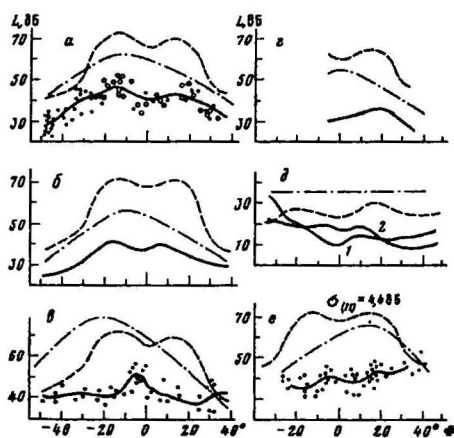


Рис.9

Результаты измерений, представлены сплошными кривыми, полученными методом скользящих средних (рис. 9б, з, д). Данные, полученные нами и ранее не публиковавшиеся, (рис. 9а, в, е), представлены полностью: экспериментальные значения – точками, осредненные кривые – сплошной линией. Данные 9-го и 11-го рейсов НИС «Академик Курчатов» объединены, так как были получены примерно в одинаковых условиях. Результаты 20-го рейса НИС «Академик Королев» не представлены ввиду небольшого массива данных. Вместе с тем широтный ход поглощения, определенный по результатам этого рейса, весьма близок к широтному ходу, полученному по данным измерений в 22-м рейсе НИС «Академик Курчатов». Максимальная погрешность каждого единичного измерения (рис. 9а, в, е), равная ± 3 дБ складывалась из методической погрешности, равной ± 1 дБ, и из аппаратурной погрешности, составлявшей ± 2 дБ. Погрешности измерений, выполненных другими авторами, нам неизвестны, но можно предполагать, что они не превышают $\pm 3 \div 4$ дБ. Анализ показал, что отклонения единичных измерений относительно сплошных кривых носят случайный характер, и их распределение близко к нормальному закону. На рис. 9а, е усреднение проводилось по 11 значениям, и разброс данных составил $\sigma = 4,0$ и $4,9$ дБ, соответственно. На рис. 9в усреднение проводилось по 5 значениям, а дисперсия равна $5,4$ дБ. Рейс «Riederstein»'а (рис. 9д) разбит на 2 этапа: первый (кривая 1) проходит в акватории Атлантики, второй (кривая 2) – в акватории Тихого океана.

Из рис. 9 видно, что практически во всех рейсах широтный ход поглощения не следует за широтным ходом полуденного угла Солнца над горизонтом (штрихпунктирные кривые). В ряде случаев экспериментальные кривые хорошо повторяют расчетные (рис. 9а, б, з). Вместе с тем сопоставление кривых 1 и 2 (рис. 9д) между собой, а также данных 22-го рейса НИС «Академик Королёв» (рис. 9в) с данными остальных рейсов указывает на наличие долготных эффектов, а точнее региональной структуры в глобальном распределении поглощения. Наиболее четко это проявляется при синоптическом анализе данных.

На рис. 10 представлено планетарное распределение поглощения. Заштрихованные участки соответствуют регионам, в которых проводились наблюдения.

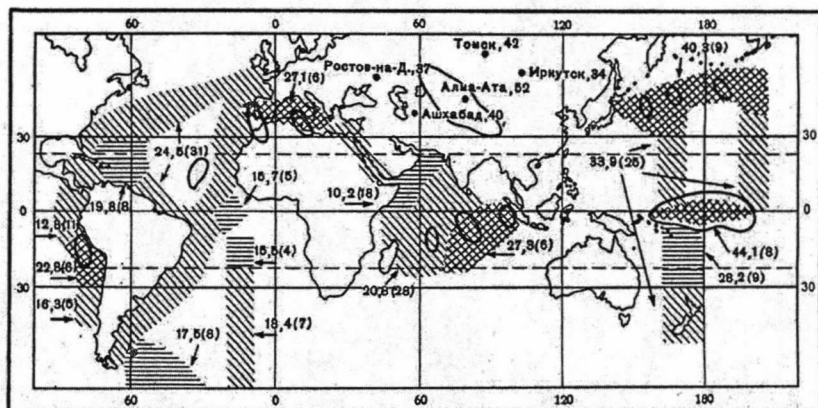


Рис. 10

Данные каждого рейса разбиты на 3 группы. Частой, косой и горизонтальной штриховкой выделены области соответственно с повышенными, промежуточными и пониженными величинами поглощения. Числа со стрелками соответствуют средним значениям L (в дБ) в зонах. Числа в скобках указывают на количество суток, в течение которых проводились измерения, и по которым проводилось усреднение. В областях с повышенным поглощением (в частности, в районе географического экватора в Тихом океане и у побережья Перу) величины L в 1,5÷1,9 раз превосходят средний фоновый уровень в соседних зонах. В области аномально низких значений L (наблюдавшихся в продолжение 14 суток), локализованной в северо-западной области Индийского океана, величина поглощения вдвое меньше фонового уровня. Оказалось, что области повышенного поглощения, которые были обнаружены по данным спутниковых измерений (сплошные овалы на рис. 10), близки, либо совпадают с зонами резкого уменьшения электронной концентрации в ночные часы на высотах ~260 км. Зоны низких значений N_e к по-

лудню полностью исчезают. Нечто подобное имеет место и в нижней ионосфере, где в полуденные часы зональная структура в поглощении выражена значительно слабее, чем в утренние часы. По данным работ, вариации N_e в ночной области F превосходят порядок величины. Поглощение в аномальных зонах (при $\chi = 60^\circ$ и 78°) может отличаться от величины L в соседних зонах в 1,5-2 раза. Оценки показывают, что эти изменения соответствуют вариациям N_e в 2-3 раза на уровне мезопаузы. Подтверждением корреляционной связи между нижней и средней ионосферой может служить известный факт аномально высоких значений поглощения в Алма-Ате, на 10-15 дБ превышающих фоновые, определенные по измерениям в Ростове-на-Дону, Ашхабаде, Томске и Иркутске.

Для объяснения причин поведения неоднородностей приведены результаты анализа зональных вариаций параметров радиозондирования ионосферы с привлечением данных мировой сети ионозондов и измерения поглощения в период МГГ. Зональные эффекты в пространственном распределении электронной концентрации n_e в D -, E - и F -слоях ионосферы искались как регулярные, положительные и отрицательные отклонения параметров X_i этих слоев от фоновых значений X_i , характерных для данной широты. Последние удобно находить методом картирования исследуемых параметров.

В широтно-долготном распределении параметров D - и F -областей ионосферы присутствуют сильные синфазные долготные вариации с волновым числом $n > 1$, не связанные (или слабо связанные) с особенностями структуры геомагнитного поля. Чтобы подчеркнуть неформальное отличие пространственных вариаций такого рода от известных долготных изменений ионосферных характеристик, вызванных несовпадением географического и геомагнитного полюсов и $n = 1$, в дальнейшем они классифицируются как зональные вариации.

Сложность характера зависимости величины L от широты пункта наблюдения известна давно. Для его объяснения предложена гипотеза о дополнительном источнике ионизации области D в виде солнечных корпускулярных потоков. Однако анализ данных наблюдений на судах в акватории Ми-

рового океана показывает, что пространственная структура величины поглощения значительно сложнее. В частности, она контролируется не только широтой, но и долготой места наблюдения. На рис.11 представлена карта полу-денной $L(\varphi, \lambda)$ -зависимости для лета (июнь–июль) 1958 г.

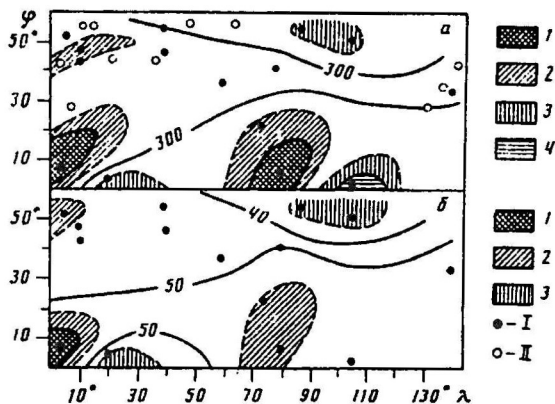


Рис.11

Точно такой же вид $L(\varphi, \lambda)$ -распределения наблюдается и в равноденствие (апрель–май и сентябрь–октябрь). Видно, что в некоторых долготных секторах градиенты $\partial L / \partial \lambda$ сопоставимы и даже превосходят градиенты $\partial L / \partial \varphi$. Большое систематическое различие в величинах L имеет место и в средних широтах, в частности между европейским (Москва–Де-Билт) и сибирским (Иркутск–Томск) секторами. Это обстоятельство приводит к тому, что $L(\varphi, \lambda)$ -зависимость носит “пятнистый” характер с хорошо выраженными локальными зонами повышенного или пониженного поглощения относительно его фонового уровня. Одна из таких зон глубокой депрессии величины L в тропических широтах в диапазоне долгот $\lambda = 30\text{--}50^\circ\text{E}$. Градиенты $\partial L / \partial \lambda$ сопоставимы и даже превосходят градиенты $\partial L / \partial \varphi$. Например, абсолютная разница в значениях L между Ибаданом и Банги, расположенных на практически совпадающих широтах, достигает 28 дБ при погрешности измерений $\delta L \leq 5$ дБ.

Анализ зональных вариаций позволил только частично объяснить сложную структуру широтно-долготного распределения параметров нижней ионосферы.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Обосновано и экспериментально установлено, что использование для импульсного зондирования радиоимпульсов с внутриимпульсной частотной модуляцией низкой частотой и измерения ее фазы в принятом сигнале, в процессе измерения ионосферного поглощения радиоволн, что позволило существенно увеличить точность измерения действующих высот отражения от слоя. Е (до среднестатистических 0.3 км.).

2. Аналитическими расчетами и путем компьютерного моделирования произведены исследования параметров передающих антенн ионозондов. В результате:

а) обоснованы рекомендации и методика расчетов для улучшения параметров существующих антенн ионозондов.

б) обоснованы принципы построения новых антенн для ионосферного измерительного комплекса.

в) исследованы антенны георадара. Проведена экспериментальная проверка моделей антенн. Принята в эксплуатацию дипольная антенна с распределенной резистивной нагрузкой. Предложена антенная система для георадара воздушного базирования.

3. Экспериментально установлено наличие неоднородности в глобальном распределении поглощения радиоволн в ионосфере.

Благодарности:

Автор выражает искреннюю благодарность всем соавторам и коллегам по ИЗМИРАН и других организаций, с которыми представилась возможность плодотворно работать, каждый из которых внес свой вклад в результаты представленной работы.

Автор благодарит своего руководителя А.Н. Козлова, который помимо руководства, является вдохновителем написания данной работы.

Автор благодарит дирекцию ИЗМИРАН за поддержку и интерес к работе.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Черкашин Ю.Н., Лукин А.А., Васильев К.Н., Васильев Г.В., Гарбацевич В.А. Никонов П.А. О расширении информативности ионосферной станции. // Тезисы докладов XI Всесоюзной конференции по распространению радиоволн. - М.: Изд. Казанского университета, 1975. - Ч. 1. - С. 24-26.
2. Гарбацевич В. А. Гивишвили Г.В. Лещенко Л.Н. Некоторые результаты ионосферных наблюдений на НИС "Академик Королев" // "Физика ионосферы и магнитосферы": Сб. статей. - М.: ИЗМИРАН. - 1978. - С. 32-33.
3. Гарбацевич В.А. О методе повышения точности измерения действующих высот отражённых от ионосферы радиоволн. // Исследования по проблемам солнечно-земной физики. - М.: ИЗМИРАН, 1977. -С. 123-133.
4. Гарбацевич В.А., Афиногенов Ю.А. Дельта-антенна с верхним питанием с помощью коаксиального фидера для исследования параметров ионосферы в корабельных условиях. // Физика ионосферы и магнитосферы. ИЗМИРАН, 1978. - С. 40-41.
5. Гарбацевич В.А. Точное измерение действующих высот ИЧМФ-методом. // Физика ионосферы и магнитосферы. - М.: ИЗМИРАН, 1978. - С. 34-39

6. Гивишвили Г.В., Флигель М.Д., Лещенко Л.Н., Гарбацевич В.А., Афиногенов Ю.А. Планетарное распределение поглощения радиоволн. // Геомагнетизм и Аэронавигация, 1980. – Т. XX. - 2. – С. 275 - 279.
7. Гивишвили Г.В., Лещенко Л.Н., Гарбацевич В.А., Афиногенов Ю.А. Stationary Large-scale Irregularities of the ionosphere. // J. Atmospheric and Terrestrial Physics. - Pergamon Press Ltd, 1982. – Vol. 44. – P. 923-924.
8. Гарбацевич В.А., Карпенко А.Л., Сильвестров С.В. Автоматизированная ионосферная система «Парус» // Проблемы автоматизации геофизических исследований: Сборник научных трудов. – М.: ИЗМИРАН. - 1989. – С. 27-31.
9. Гивишвили Г.В., Гарбацевич В.А., Лещенко Л.Н., Ситнов Ю.С. Зональные вариации параметров ионосферы ниже главного максимума N_e // Геомагнетизм и Аэронавигация, 1989. – Т. XXIX. - 6. –С. 965-972.
10. Патент 2081456 РФ, МПК 6 G 08 B 13/22, G 08 C 19/00. Способ дистанционной передачи сообщения и устройство для его осуществления. // Гарбацевич В.А., Копейкин В.В. – 93028877/09; Заявлено 08.06.93; Опубликовано 03.01.1996.
11. Патент 2080622 РФ. МПК 6 G 01 S 13/95. Устройство для радиолокационного зондирования подстилающей поверхности. // Гарбацевич В. А., Копейкин В.В., Кюн С.Е., Щекотов А.Ю. – 9005474/09; Заявлено 15.02.1994. Оpubл. 27.05.1997, бюл. 15.
12. Копейкин В.В., Едемский Д.Е., Гарбацевич В.А., Попов А.В., Резников А.Е. Георадары повышенной мощности. // 52 Науч. сес. посвящ. дню радио. – Москва, 1997. – С. 241-242.
13. V.V. Kopeikin, D.E. Edemsky, V.A. Garbatsevich A.V. Popov, A.E. Reznikov, A.Yu. Shchokotov. Enhanced power ground penetrating radars: Conference proceedings. // 6th International conference on Ground Penetrating Radars. GPR'96 (Sendai, Japan, Sept. 30 – Oct. 3, 1996). – P. 515-517.
14. V.V. Kopeikin, D.E. Edemsky, V.A. Garbatsevich, A.V. Popov, A.E. Reznikov, A.Yu. Shchokotov. Georadar development at IZMIRAN: Conference proceed-

ings. // International microwave conference MICON-96 (Poland, Warsaw, May 27 - 30, 1996). Vol. 2. – P. 509-511.

15. Гарбацевич В.А., Козлов А.Н., Ромбические антенны ионозонда – результаты компьютерного моделирования. // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов, 2008. – 10. – С. 243 – 249.

16. Гарбацевич В.А., Козлов А.Н., Передающие антенны ионозонда – результаты компьютерного моделирования. // Тезисы докладов XIV региональной конференции по распространению радиоволн (Санкт-Петербург, 11–13 ноября 2008). – М.: СПбГУ 2008, С. 64 – 65.



Подписано в печать 18.11.2008 г.
Формат 60х84/16. Печ. л. 1.75.
Тираж 100 экз. Заказ 2282.

Издательство «Трoвaнт»
ЛР 071961 от 01.09.1999 г.

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии издательства «Трoвaнт».
142191, г. Троицк Московской обл., м-н «В», д. 52.
Тел. (495) 775-43-35, (4967) 50-21-81
E-mail: trovant@ttk.ru, <http://www.trovant.ru/>

70-